

# Steuerung und Regelung in der Elektrischen Energietechnik

Leonhard, Werner

Veröffentlicht in:  
Jahrbuch 1993 der Braunschweigischen  
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.65-76



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen



auch in Dänemark, wo viele Windkraftanlagen arbeiten, liegt ihr Anteil bei 2 %, der Rest stammt aus thermischen Kraftwerken. Die oft zu hörende Forderung nach einem schnellen Ausstieg aus der Kernenergie stößt sich deshalb an der harten Realität: abgesehen von wirtschaftlichen Folgen, wäre er nur bei Inkaufnahme erhöhter CO<sub>2</sub>-Produktion erreichbar, was schlimme Auswirkungen auf die Umwelt hätte. Diese unerfreuliche Alternative ließe sich zwar durch rigoroses Energiesparen, d. h. Verzicht auf manche Annehmlichkeiten unseres Lebens auflösen; wenn man sich aber an die jahrelange Diskussion über eine allgemeine Geschwindigkeitsbegrenzung auf den Autobahnen erinnert, so ist zu vermuten, daß die meisten Bürger nicht bereit wären, freiwillig auch nur geringe Einschränkungen hinzunehmen. Man müßte schon Zwang anwenden, was Politiker mit Blick auf die nächste Wahl nicht schätzen. Ein kürzlich veröffentlichtes „Ausstiegs-Szenario“ für das Land Niedersachsen enthielt den Vorschlag, kurzerhand die Stromlieferungen nach Nordrhein-Westfalen einzuschränken, um die niedersächsische CO<sub>2</sub>-Bilanz nach einem „Ausstieg“ zu schönen; dies gibt einen Hinweis auf die Fragwürdigkeit solcher Konzepte.

Elektrizität ist eine besonders hochwertige Form von Energie, denn sie läßt sich

- aus allen Primärenergien, weit entfernt vom Verbraucher, und bei bestmöglicher Rücksichtnahme auf die Umwelt gewinnen,
- materiefrei und verlustarm über weite Entfernungen übertragen, verteilen sowie
- in jede beliebige Endform zurückverwandeln.

Ein elektrisches Netz macht diese aufbereitete Energie verfügbar, indem alle Primärenergien alle Arten von Endverbrauchern versorgen. Da elektrische Energie selbst nicht nennenswert speicherbar ist, bietet das Netz mit seinen rotierenden Maschinen einen kurzfristigen Ausgleich für die schnellen Schwankungen der gelieferten und bezogenen Leistungen; bei längerfristigen Veränderungen des Bedarfs oder bei Netzstörungen sind regelnde Eingriffe in den Kraftwerken nötig.

Ausgehend von kleinen städtischen und regionalen Netzen haben sich im Lauf von hundert Jahren große Verbundnetze entwickelt, die sich heute über ganze Kontinente erstrecken. Das westeuropäische Netz reicht von der Südspitze Spaniens unter Einschluß von Sizilien und Teilen Dänemarks bis zum Peloponnes, gegenwärtig mit kriegsbedingten Unterbrechungen auf dem Balkan; man kann es mit einer großen Transmissionswelle vergleichen, die alle Generatoren bei endlichen und wechselnden Winkelverdrehungen synchron verbindet. Je größer das Netz ist, desto leichter kann es unerwartete Lasten aufnehmen oder mit Störungen fertigwerden. Auch werden tageszeitliche Verschiebungen im Verbraucherverhalten ausgeglichen, so daß die vorhandenen Anlagen sich besser nutzen lassen. Im Bild 2 ist das dichte Netz der Hochspannungsleitungen gezeigt, dem regionale und lokale Netze niedriger Spannungen unterlagert sind, bis hin zu den Anschlüssen im einzelnen Haushalt. Die neuen Bundesländer sind noch mit dem osteuropäischen Netz verbunden; demnächst, wenn die nötigen Leitungen fertiggestellt sind, soll die Umschaltung an das westeuropäische Netz erfolgen. In den osteuropäischen Nachbarländern besteht der gleiche Wunsch, doch wird es einige Zeit dauern, bis die dafür nötigen technischen Voraussetzungen geschaffen sind.

**SCHEMA SIMPLIFIE DES INTERCONNEXIONS  
DES PAYS DE L'U.C.P.E.**

VEREINFACHTES SCHEMA DES VERBUNDNETZES  
DER UCHPTE-LÄNDER

SIMPLIFIED DIAGRAM OF THE INTERCONNECTED NETWORK  
OF THE U.C.P.T.E. COUNTRIES

31.XII.92

Les sons représentés sur les lignes à 380 Hz et à 220 Hz les plus proches de la fréquence fondamentale du langage sont les plus susceptibles d'être perçus comme des sons de parole.

Les fibres franchissant les frontières à tension  $\pm 150$  kV sont représentées groupées. Une partie des groupes a l'aspect de

Die Arbeitszusammenfasser haben sich im Übrigen auf folgende Punkte geeinigt:

<sup>1</sup> Only the most important 100 *ix* and 200 *ix* bins are represented, with the possible addition of the number of records within a bin to be 100,000.

The stand-off distance (meters) is a voltage = 150 kV and ionospheric as a group (see details of the groups in the article 9)

300 kV      277 kV      1: 150 kV

Sur les rapports sur les échanges, nous allons dans le sens des autres

In den Messungen erhält der  $x$  Messungswert folgende Stromwerte in einem bestimmten Vorzeichen

<sup>a</sup>In the reports 300-1796 & 300-1797 those done in the direction of the arrows are given a plus sign.

[illegible][illegible]

PORTUGAL

Figure 1 is a schematic diagram of the experimental setup. It shows a power supply connected to a transformer, which is connected to a series of components including a switch, a resistor, and a lamp. The diagram is labeled with various electrical symbols and components.

712

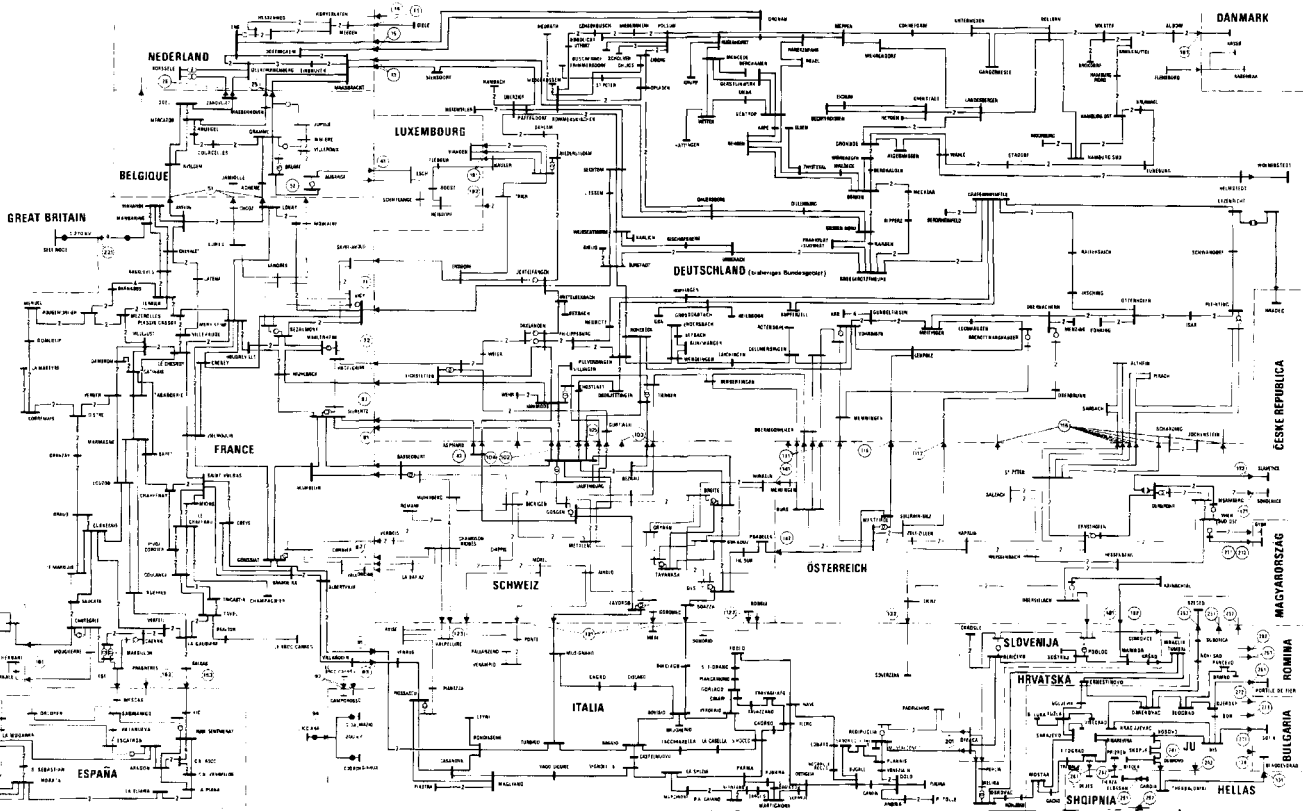


Bild 2

### Westeuropäisches Hochspannungs-Verbundnetz

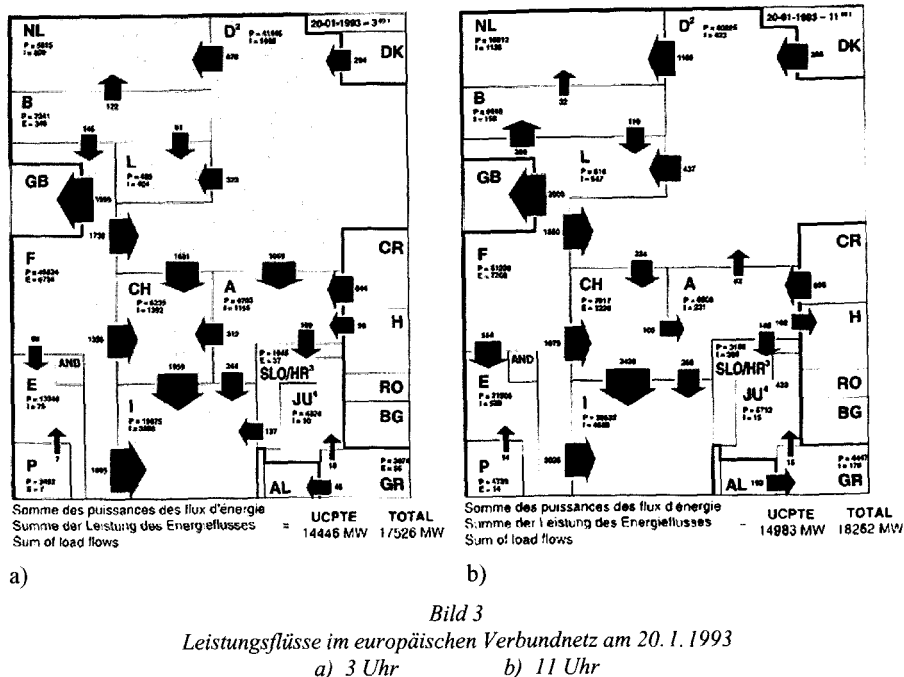


Bild 3  
Leistungsfüsse im europäischen Verbundnetz am 20.1.1993  
a) 3 Uhr b) 11 Uhr

Im Hochspannungsnetz bilden sich Leistungsflüsse aus, die physikalischen Gesetzen folgen und ohne politische Interventionen oder Grenzkontrollen einen Lastausgleich bewirken. Der grenzenlose „Spot-Markt“ für elektrische Energie ist also seit langem Realität. Natürlich kann es aber nicht Ziel einer rationellen Betriebsführung in dem verschiedenen Staaten und Versorgungsunternehmen gehörenden Verbundnetz sein, den Energiefluß, der sich auf die Belastung der Kraftwerke, Leitungen, Schalter und Transformatoren auswirkt, Zufälligkeiten zu überlassen. Deshalb sind an allen Knoten des Netzes, insbesondere in den Kraftwerken und Umspannstationen, Regelanmaßnahmen notwendig, um die Leistungen in die gewünschten Bahnen zu lenken; ein Ergebnis ist als Augenblicksaufnahme in Bild 3 zu sehen.

Es zeigt die über die Kuppelleitungen fließenden und über einige Minuten gemittelten Austauschleistungen als konsolidierte Energieströme. Man erkennt in beiden Zeitintervallen Export- und Importländer für elektrische Energie, wobei verschiedene Ursachen bestimmend sein können: In den Alpenländern mit großem Wasserkraftanteil geht die Energielieferung im Winter zurück, so daß thermisch erzeugte Energie importiert werden muß, während sich bei der Schneeschmelze im Frühjahr ein exportfähiges Überangebot einstellt. Es kann sich aber auch um vorübergehende regionale Störungen handeln, die sich auf das Verbundnetz auswirken; so waren z. B. vor einigen Jahren wegen eines plötzlichen Wintereinbruchs mehrere große Kraftwerke in Westfrankreich für einige Stunden außer Betrieb, so daß im Verbundnetz kurzfristig 8000 MW fehlten und von den Partnern geliefert werden mußten, was zu einer kurzzeitigen Frequenzabsenkung

von 0.5 Hz entsprechend 1 %, führte. Ein weiterer Grund für länger dauernde überregionale Energieflüsse kann schließlich ein geplanter und in Lieferverträgen vereinbarter Austausch sein; in Bild 3 überlagern sich alle diese Effekte.

Bei längerfristiger Bilanzierung, etwa über ein Jahr, ist erkennbar, daß sich im Netzverbund ausgeprägte Export- und Importpositionen herausgebildet haben, ähnlich wie das beim Warenaustausch der Fall ist. Frankreich ist zu einem Großexporteur elektrischer Energie vor allem nach Großbritannien (über eine Gleichstrom-Kabelverbindung), nach Italien (direkt und über die Schweiz) und (über Belgien und Deutschland) in die Niederlande geworden; auch in Österreich, das traditionell Exportland war, gibt es inzwischen einen leichten Importüberschuß. In Deutschland ist die elektrische Energiebilanz wegen des derzeit geringeren Bedarfs ausgeglichen.

Wenn man nach den Ursachen fragt, drängt sich der Gedanke an die Energiepolitik der verschiedenen Länder auf. In Italien und Österreich ist die Kernenergie durch Gesetz geächtet, man importiert lieber aus Kernenergie entstandenen Strom, was zwar das Restrisiko nicht beseitigt aber die politische Diskussion erleichtert. In Österreich wurde gar ein betriebsfertiges Kernkraftwerk eingemottet, um Strom von den Nachbarn aus Kraftwerken russischer Bauart zu beziehen, ein besonderer Fall von Selbsttäuschung. Anders ist es in Großbritannien, wo es zwar Kernkraftwerke gibt, möglicherweise aber die niedrigeren Kosten jenseits des Kanals ausschlaggebend sind. Bei uns gibt es wegen mangelnden politischen Konsenses über die weitere Energiepolitik praktisch einen Baustop für Neuanlagen, was dazu führen wird, daß bei einem Wiederanstieg des Bedarfs auch Deutschland zu einem Importland wird; die dafür benötigten Kernkraftwerke stehen unmittelbar jenseits der Landesgrenze schon bereit. Offensichtlich sind selbst in Industrieländern manche Politiker mit vorausschauenden Überlegungen überfordert, weshalb sie außerstande oder nicht willens sind, den Menschen klarzumachen, daß es nicht nur praktisch-wirtschaftliche, sondern auch moralische Grenzen für den Import von Wohlstand und Bequemlichkeit und den ohnehin nur scheinbaren Export von Risiken gibt.

### **Technische Voraussetzungen für einen elektrischen Energiemarkt**

Wie schon erwähnt, folgt der in Bild 3 erkennbare Leistungsfluß zwischen den Partnern im Verbundnetz physikalischen Gesetzen, doch ist dies auch das Ergebnis zahlloser verteilter Regelvorgänge im Netz. Aus der Sicht des Betreibers eines Kraftwerkes oder eines regionalen Teilnetzes interessieren dabei vor allem die technischen Randbedingungen für einen sicheren und wirtschaftlichen Betrieb. Hier ist zu bedenken, daß ein thermisches Kraftwerk, fossil oder nuklear, zu den kompliziertesten Anlagen der Technik gehört, vergleichbar einem chemischen Werk oder einer Raffinerie. In einem neuzeitlichen Kraftwerk werden mehrere tausend physikalische Größen meßtechnisch erfaßt und von lokalen Regelungen auf vorgegebenen, z. B. lastabhängigen Sollwerten gehalten. Nur so ist es möglich, die zulässigen Material- und Sicherheitsgrenzen einzuhalten, andererseits die Anlagen aber auslegungsgemäß, d. h. wirtschaftlich zu betreiben. Bei den

Meßgrößen handelt es sich um physikalische Größen aller Art, etwa Spannungen, Ströme und Leistungen, Drehzahlen und Frequenzen, Füllstände, Drücke und Temperaturen bis hin zu Stoffkonzentrationen im Kesselspeisewasser und Rauchgas. Ähnlich ist es in den Umspannstationen, wo vorzugsweise elektrische Größen, wie Spannungen und Blindleistungen über Stufentransformatoren und Leistungsschalter gesteuert werden.

An die zugehörigen Steuerungs- und Regelungssysteme, die heute meist elektronisch und dank der Entwicklung der Mikroelektronik zunehmend digital arbeiten, werden ganz unterschiedliche dynamische Anforderungen gestellt. Manche Größen, etwa Temperaturen, ändern sich nur langsam, andere dagegen sehr schnell, was entsprechend reaktionsfähige Meß- und Regelgeräte voraussetzt. Um z. B. nach Blitz einschlag in eine Freileitung die Störungsstelle innerhalb einer Netzperiode,  $1/50$  sec, lokalisieren und gegebenenfalls das betroffene Leitungsstück abschalten zu können, sind hochentwickelte Analyseprogramme erforderlich, die in den Schutzgeräten auf leistungsfähigen Mikrorechnern ablaufen. Bei größeren Netzstörungen massieren sich in den Netzleitstellen die Störungsmeldungen so, daß die menschliche Reaktionsfähigkeit überfordert ist und nur automatisierte Schutzzeineinrichtungen Aussicht auf Erfolg bieten.

Nachdem die Funktionsfähigkeit der Anlagen auf betrieblicher Ebene, und damit auch die kurzfristige Nachbarschaftshilfe der Netzparker im Störfall, gewährleistet ist, stellt sich die Frage, wie die Kraftwerke eines regionalen oder nationalen Teilnetzes im konkreten Fall betrieben werden sollen. Dies ist Gegenstand von Zustandsanalysen und Entscheidungen in den Netzleitstellen, wobei die Auswirkungen aller denkbaren Störfälle zu untersuchen sind, um die vorhandenen Sicherheitsreserven abzuschätzen und gegebenenfalls Abhilfemaßnahmen zu ergreifen; Lastprognosen sind auszuwerten, um Generatoren rechtzeitig ans Netz zu bringen oder stillzusetzen. Einen längeren Zeithorizont haben dagegen wirtschaftliche Optimierungsrechnungen; da jedes Kraftwerk eine andere Kostenstruktur aufweist, muß – immer unter Aufrechterhaltung eines sicheren Netzzustandes – eine Betriebsweise mit geringsten Gesamtkosten gesucht werden. Der Umfang solcher Rechnungen ist erheblich, wenn man die verschiedenen Arten von Kraftwerken bedenkt (fossil, nuklear, Wasserkraft ohne und mit Pumpbetrieb, usw.), ihre jeweiligen Betriebszustände, die Topologie des Netzes, was Einfluß auf die Stabilität und die Übertragungsverluste hat, und schließlich die veränderliche Preisgestaltung zu Spitzen- und Nebenzeiten. Elektrische Energieversorgungsunternehmen gehörten in den 60er Jahren zu den Pionieren der Datenverarbeitung in großem Stil, die die Entwicklung dieser Technik mitbestimmt haben. Die Steuerung und Regelung in der elektrischen Energieversorgung setzt eine schnelle und sichere Übertragung von Meß- und Stellsignalen mit Kabeln und Funkverbindungen über weite Entfernungen voraus; eine neue Entwicklung sind in die Hochspannungsleitungen integrierte Lichtleiter.

Nachdem in den regionalen Teilnetzen die Voraussetzungen für einen Parallelbetrieb am Verbundnetz geschaffen sind, kann auch ein gezielter und auf festen Lieferverträgen basierender Transfer von Energie zwischen den Teilnetzen stattfinden. Im einfachsten Fall wird dazu die Kraftwerksleistung im Liefernetz erhöht und im Empfangsnetz reduziert; die elektrische Leistung fließt dann, wie in einem vermaschten Rohrleitungsnetz, auf den Wegen geringsten Widerstandes in die gewünschte Richtung. Dabei werden be-

nachbarte Teilnetze tangiert, auf deren Leitungen sich die Leistungen ändern; möglicherweise können sich auch örtliche Überlastungen einstellen, was durch transformatorisch eingekoppelte Zusatzspannungen korrigiert werden muß. Für einen überregionalen Energietransport ist deshalb die Zustimmung aller betroffenen Partner notwendig.

Im Rahmen des gemeinsamen europäischen Marktes werden weitergehende Vorstellungen eines völlig freien Zugangs zum Verbundnetz diskutiert, der es z. B. einem Energieversorgungsunternehmen ermöglichen würde, einen Sondertarif-Liefervertrag mit einem Großabnehmer in einem nicht angrenzenden Land abzuschließen und die Leistung über das anderen Partner gehörende Verbundnetz zu schicken. Die organisatorischen, rechtlichen und finanziellen Fragen eines völlig liberalisierten Energiemarktes sind noch ungeklärt; es kann noch lange dauern, bis eine für alle Beteiligten annehmbare Lösung gefunden ist. Die Erfahrungen bei der Liberalisierung des Flugverkehrs und des straßengebundenen Güterverkehrs werden zweifellos wertvolle Hinweise geben.

### **Geregelte elektromechanische Energiewandlung**

Die größte Gruppe von Verbrauchern, die etwa die Hälfte der in einem Industrieland erzeugten elektrischen Energie aufnehmen und in mechanische Arbeit zurückverwandeln, sind elektrische Maschinen aller Art, Bild 1. Bei Produktions- und Umformprozessen, Transportvorgängen für Personen und Güter, aber auch als unermüdliche Helfer im Haushalt, von Waschmaschinen bis hin zu elektrischen Uhren und Videorecordern, ist mechanische Arbeit in verschiedenster Form unentbehrlich. Der Leistungsbereich elektrischer Maschinen überdeckt mehr als acht Größenordnungen; Zentrifugen erfordern Drehzahlen über 100 000 Umdrehungen je Minute, langsamlaufende getriebelose Erzmühlen dagegen Drehmomente über 1000 Metertonnen, entsprechend dem Gewicht eines Autos an einem Hebelarm von 1 km Länge; es gibt kein anderes Antriebsprinzip, das in der Lage wäre, einen derartig weiten Bereich zu überdecken. Allerdings benötigen die Antriebe eine kontinuierliche elektrische Energiezufuhr, was Einschränkungen bei Fahrzeugen bedeutet; da ein heutiger elektrochemischer Speicher das 50fache Gewicht eines Treibstofftanks vergleichbaren Energieinhalts aufweist, gibt es noch keine freizügig verwendbaren Elektrofahrzeuge. Anders ist es bei spurgeführten Verkehrsmitteln mit Stromzufuhr, hier ist der elektrische Antrieb allen anderen überlegen.

Elektrische Antriebe haben unsere Lebensform entscheidend geprägt. Ballungszentren und Bürohochhäuser ohne ein leistungsfähiges Nahverkehrssystem und elektrisch angetriebene Aufzüge wären nicht lebensfähig und auf elektrische Hausgeräte will niemand verzichten. 1991 ist, im Gegensatz zur Industrie, wo man zu energiesparenden Produktionsverfahren übergeht, der in den Haushalten verbrauchte Strom, entsprechend einem Viertel der gesamten elektrischen Energie, nochmals um 5 % angestiegen; hier gibt es keinerlei Akzeptanzprobleme, denn körperliche Mühen sind nur willkommen, wenn man sie freiwillig erbringt. (Ohne allzugroße Übertreibung könnte man behaupten, daß die elektrische Waschmaschine den Menschen, vor allem Frauen, mehr an persönlicher Selbstbestimmung gebracht hat, als alle politischen Befreiungsprogramme seit der französischen Revolution.)



Der größte Teil der elektromechanischen Energiewandler sind sog. Konstantantriebe, deren Drehzahlen unverändert bleiben, etwa Pumpen in Speicherkraftwerken, Rolltreppen oder Kühlgebläse, die keiner Regelung bedürfen. Anders ist es bei einer kleineren, aber wachsenden Gruppe von sog. Regelantrieben, deren Drehmoment und Drehzahl an die Last anzupassen sind. Anlaß kann der Wunsch nach Energieeinsparung bei Teillast sein oder Forderungen der Automatisierung, z. B. wenn die Antriebsmotoren von Werkzeugmaschinen genau koordinierte Bewegungen auszuführen haben. Hier geht die Tendenz seit langem zu verteilten Antrieben, indem die verschiedenen Arbeitsachsen nicht mehr von einer gemeinsamen Welle, sondern vielen separaten Motoren angetrieben werden, die nur noch elektronisch gekoppelt sind. Große Papiermaschinen, die 10 m breites Zeitungspapier mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h erzeugen, haben 20 und mehr Teilantriebe, deren Drehzahlen aufs genaueste abgestimmt sein müssen, um Faltenbildung oder ein Reißen der Papierbahn zu vermeiden. Bei Robotern hat jede Achse einen eigenen unabhängigen Antriebsmotor, der vorberechnete Bewegungen so auszuführen hat, daß sich insgesamt die gewünschte räumliche Bahnkurve einstellt und die Roboterhand mit Werkzeug eine vorgegebene Lage und Orientierung einnimmt. Oft sind die Antriebsmotore in die Arbeitsmaschine integriert, um mechanische Leistung genau an der Stelle und in der Form zu erzeugen, wie die Last sie benötigt.

Dank der Entwicklung der Halbleitertechnik ist das Gebiet der Regelantriebe seit 20 Jahren in einer völligen Umwälzung begriffen. Dies hängt mit der Ablösung der bisher dominierenden Gleichstrommaschine zusammen, die zwar ideale Regeleigenschaften aufweist, deren mechanischer Stromwandler aber die Drehzahlen und Leistungen begrenzt. Bei Drehstrom-Regelantrieben entfallen solche Einschränkungen, da die Stromwendung außerhalb der Maschine in einem ruhenden Umrichter erfolgt. Die wesentlichen Umrichter-Bauelemente sind elektronische Schalter, d. h. Halbleiterplättchen, deren elektrischer Widerstand durch ein kleines Steuersignal verändert werden kann. Ein Beispiel sind sog. Thyristoren, bei denen dotierte Si-Einkristalle im „nichtleitenden“ Zustand eine Spannung über 5000 V sperren und im „leitenden“ Zustand einen Strom von 5000 A, kurzzeitig auch 50 000 A, führen können. Der wirksame Widerstand der Halbleiterzelle ändert sich dabei um mehr als neun Größenordnungen. Durch schnelles periodisches Schalten dieser Elemente lassen sich die Spannungen und Ströme, und damit Drehzahl und Drehmoment der Motoren, freizügig steuern. Es gibt heute Halbleiterschalter für die verschiedensten Spannungs- und Strombereiche; bei genügend kurzer Umschaltzeit kann man die Schaltfrequenz der Umrichter bis in den 10 kHz-Bereich steigern, um die Reaktionsgeschwindigkeit der Antriebe zu erhöhen. Servoantriebe kleiner Leistung (< 10 kW), wie sie als Vorschubantriebe in Werkzeugmaschinen verwendet werden, haben Reaktionszeiten für das Drehmoment unter  $1/1000$  sec, so daß auch höchste dynamische Anforderungen erfüllbar sind. Bei großen Drehstrom-Bahnantrieben (bis 1600 kW je Antriebssachse) liegen die erreichbaren Schaltfrequenzen deutlich niedriger, unter 1 kHz; dennoch läßt sich mit einer schnellen Drehmomentregelung ein Durchdrehen der Räder beim Anfahren oder das Blockieren beim Bremsen verhindern. Dies erhöht, verglichen mit früheren Antrieben, die maximale Zugkraft bei gegebener Radlast, was zu einem geringeren Gewicht der Lokomotive und reduzierten Leistungsverlusten führt.

Ein zweiter Bereich, wo die Halbleitertechnik wesentliche Fortschritte für elektrische Antriebe gebracht hat, ist deren Steuerung und Regelung. Drehstrommaschinen haben eine viel kompliziertere dynamische Struktur als Gleichstrommaschinen, was die Regelung anfangs sehr erschwerte. Hier haben mikroelektronische Bauelemente, insbesondere Mikroprozessoren, deren aktive Zellen ebenfalls aus Si-Einkristallen bestehen, die Möglichkeit geschaffen, viele der nichtlinearen Steuerfunktionen zu digitalisieren und damit einer programmiertechnischen Lösung zugänglich zu machen. Der mögliche Umfang der Signalverarbeitung und die erreichbare Flexibilität haben sich damit in kaum vorstellbarer Weise erweitert, ohne daß der Aufwand entsprechend angestiegen ist. Bild 4 macht dies deutlich; der gezeigte Mikrorechner mit zwei Mikroprozessoren ist im Prinzip in der Lage, je Sekunde 10 Millionen Gleitkomma-Multiplikationen auszuführen. Beide Versionen der Halbleitertechnik, Leistungselektronik bei den Umrichtern und Mikroelektronik bei der Signalverarbeitung, waren für den heutigen Stand der Drehstrom-Antriebstechnik von entscheidender Bedeutung.

Der bei der Regelung eines elektromechanischen Systems manchmal notwendige Aufwand an Echtzeit-Signalverarbeitung sei an dem in Bild 5 gezeichneten Schema eines dreiachsigen Roboters illustriert. Das angedeutete Gerät (industrielle Roboter haben meist sechs oder mehr Achsen, um außer dem Ort auch die Orientierung der Roboterhand vorgeben zu können) wird durch elektrische Servomotoren angetrieben, die über Untersetzungsgetriebe Drehmomente an den Gelenken erzeugen und vorgegebene Drehwinkel einstellen. Durch Vorgabe der Drehwinkel kann somit die Hand des Roboters auf einer gewünschten Bahn im kartesischen Raum bewegt werden, wobei der Zusammenhang zwischen Gelenkwinkeln und Raumkoordinaten durch einen Satz nichtlinearer Transformationsgleichungen gegeben ist. Im Betrieb des Roboters ist das inverse Problem zu lösen: Die durch die Aufgabenstellung definierte kartesische Bahn der Roboterhand, z. B. längs einer Schweißnaht, muß durch Vorgabe der erforderlichen Ge-

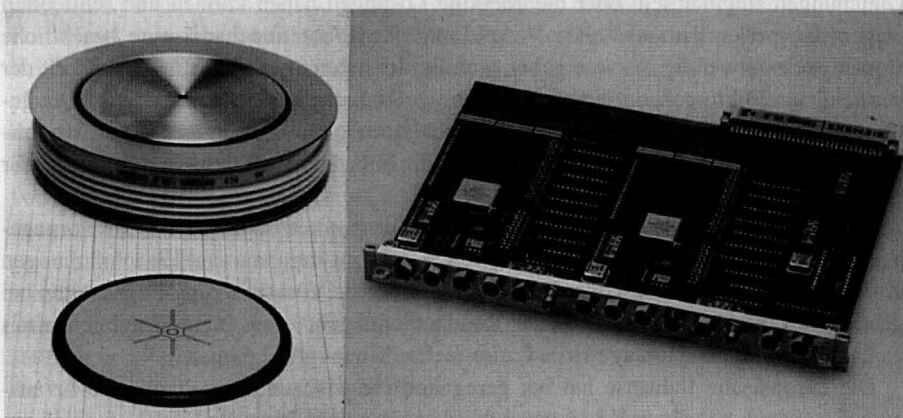


Bild 4

Leistungselektronischer Schalter und Mikrorechner

## Hin-Transformation

$$x_1 = [r_2 \cos \varepsilon_2 + r_3 \cos (\varepsilon_2 + \varepsilon_3)] \cos \varepsilon_1$$

$$x_2 = [r_2 \cos \varepsilon_2 + r_3 \cos (\varepsilon_2 + \varepsilon_3)] \sin \varepsilon_1$$

$$x_3 = r_2 \sin \varepsilon_2 + r_3 (\varepsilon_2 + \varepsilon_3)$$

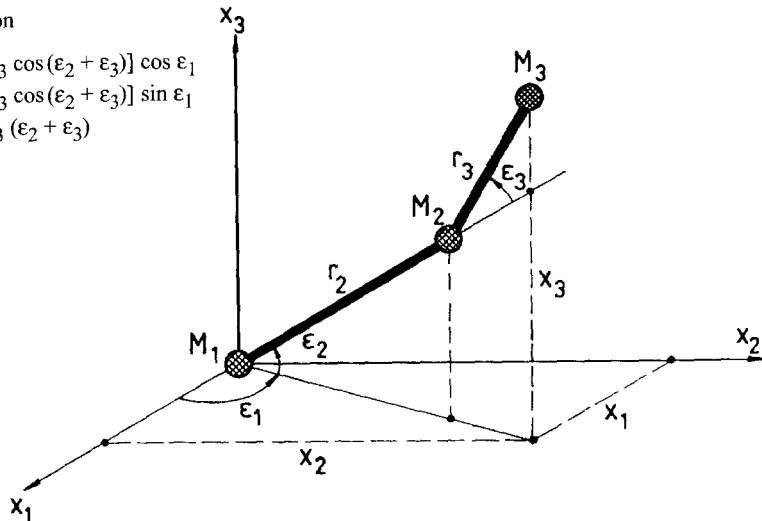


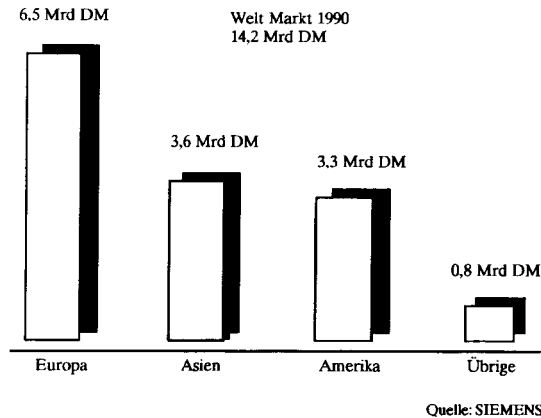
Bild 5

*Schema eines dreiaxigen Gelenkroboters*

lenkwinkel erzeugt werden. Die Transformationsgleichungen sind also für veränderliche kartesische Werte  $x(t)$  nach den notwendigen Gelenkwinkeln  $\alpha(t)$  aufzulösen, was wegen der Nichtlinearität der Gleichungen nicht geschlossen möglich ist. Hinzu kommt, daß diese Rechnung außerordentlich schnell erfolgen muß; für eine geschmeidige und reaktionsfähige Bahnführung des Roboters ist es wünschenswert, die im Rhythmus von  $1/1000$  sec arbeitenden Winkelregler in jedem Abtastzyklus mit neuen Winkelsollwerten zu versorgen. Bedenkt man, daß noch drei Richtungs-Freiheitsgrade hinzukommen, die Gleichungen singular sein oder mehrdeutige Lösungen haben können und schließlich wegen der großen geometrischen Verstärkung der Robotermechanik eine beachtliche Genauigkeit notwendig ist, so ergeben sich Forderungen an die Leistungsfähigkeit der verwendeten Mikrorechner, die noch vor wenigen Jahren Großrechnern angemessen gewesen wären. Schließlich soll das Ganze auch zu möglichst geringen Kosten verwirklicht werden, da es sich ja nicht um Geräte für die Forschung, sondern um Maschinen für eine rationellere Produktion handelt.

Wenn einige oder alle Bewegungsachsen anstelle geometrischer Bahnen auf vorgegebene Drehmoment- oder Kraftverläufe geregelt werden, kann man mit Einschränkungen von einem Roboter mit Tastsinn sprechen. Dies ist eine Voraussetzung für Arbeiten bei geometrisch nicht genau definierten Randbedingungen, etwa beim Entgraten eines Gußstückes oder der Montage eines Rades in der Fahrzeugfertigung.

Die europäische Industrie hat bei geregelten elektrischen Antrieben einen herausragenden Stand, wie die in Bild 6 gezeigte Marktübersicht erkennen läßt. Auf vielen anderen Gebieten der Technik ist die Situation leider ungünstiger; dort ist Europa längst an die zweite oder dritte Stelle zurückgefallen.



*Bild 6*  
Weltmarkt bei geregelten elektrischen Antrieben

### Energieeinsatz und Automatisierung ohne Grenzen?

Angesichts der atemraubenden Evolution bei der Umwandlung elektrischer Energie und ihrer Steuerung und Regelung stellt sich natürlich die Frage, ob ein Ende dieser Entwicklung abzusehen ist. Da die physikalischen Grenzen, insbesondere in der Mikroelektronik, noch nicht erreicht sind, könnte man an automatische Fabriken, Verkehrssysteme für unbegrenzte Mobilität, oder an intelligente und willige Diener in Haushalt und Büro denken. Es hat nicht an Visionen gefehlt, was eines Tages alles zu erwarten sei, um das Leben noch angenehmer, müheloser und abwechslungsreicher zu machen. Dennoch verbreiten sich, auch unter sonst zum Optimismus neigenden Ingenieuren, Zweifel, ob das alles sinnvoll und wünschenswert ist. Gewiß bedeutet Technik immer noch humanitären Fortschritt, da sie den Menschen von körperlicher Fron befreit und ihm ermöglicht, seine Kräfte Höherem zuzuwenden; das gilt heute wie vor hundert Jahren. Aber ist das von allen körperlichen und geistigen Anstrengungen befreite mühelose Leben wirklich ein erstrebenswertes Ziel? Hinzu kommt, daß die Technik bei konzentriertem Einsatz auch als Bedrohung empfunden wird. Wie ein Medikament ist sie ambivalent, denn es hängt von Anwendung und Dosierung ab, welche Wirkungen überwiegen. Mit Hubschraubern lassen sich Menschen retten, aber auch Kriege führen, und das Fernsehen kann Bildung vermitteln oder Einsamen und Kranken eine Hilfe sein, sie kann aber auch eine verantwortliche Erziehung vereiteln. Natürlich kann man Flugzeugkonstrukteure nicht für den kriegereischen Einsatz von Hubschraubern und Nachrichtentechniker nicht für die Gestaltung von Fernsehprogrammen verantwortlich machen, vielmehr kommt es immer auf die Nutzung der technischen Möglichkeiten an.

Auch nehmen die Zweifel zu, ob wir künftig zum verantwortlichen Umgang mit der Technik immer in der Lage sein werden. Erinnern wir uns an die Aufbruchstimmung bis zur ersten Energiekrise vor zwanzig Jahren, Armstrong auf dem Mond, immer kühnere

Bauwerke, autogerechte Städte – und schauen wir uns heute manche von Vandalen heimgesuchte Innenstädte und Hochschulquartiere an! In automatischen Verkehrssystemen, die technisch möglich, wegen des ausufernden Autoverkehrs wünschenswert und angesichts eines Personalkostenanteils von 70 % im heutigen öffentlichen Personen-Nahverkehr vielleicht sogar kostendeckend wären, bestünde kein Bedarf für Zugführer und Schaffner, dafür um so mehr für Wachpersonal und Polizisten; offenbar sind wir außerstande, unsere Erziehungsprobleme zu lösen. Hier sind die Grenzen des Fortschritts mit Händen zu greifen.

Wie wären solche Fehlentwicklungen zu korrigieren? Sicher nicht durch Rückkehr zum einfachen ländlichen Leben, Entzug der industriellen Basis, Rationierung von Energie, Stromabschaltung oder Vervielfachung der Energiepreise; angesichts unserer heutigen Bevölkerungsdichte könnten bürgerkriegsähnliche Verteilungskämpfe die Folge sein. Und was soll aus den Menschen in der Dritten Welt werden, die sich alle ein besseres Leben von der Technik erhoffen? Diese zu verteufeln und gleichzeitig von der scheinbar sicheren Warte des Industrielandes für die eigene Bequemlichkeit zu nutzen, wäre allzu kurzsichtig und egoistisch. Wenn überhaupt, lassen die zu beobachtenden Schwierigkeiten sich nur gemeinsam beheben; Geistes- und Sozial-Wissenschaften sind dabei ebenso gefordert wie Erzieher und Ingenieure, denen man den schwarzen Peter oft allein zuschiebt. Hoffen wir, daß die Menschheit, die bei der Entwicklung der Technik soviel Einfaltsreichtum erkennen ließ, auch zur Lösung der Folgeprobleme fähig ist. Die Humanisierung des Umgangs mit der Technik ist eine Zukunftsaufgabe, die uns alle angeht.

---

Prof. (em.) Dr.-Ing. Dr. h. c. Werner Leonhard  
Am Schiefen Berge 32 · 38302 Wolfenbüttel